第28卷 第2期 腐蚀科学与防护技术 Vol.28 No.2
2016年3月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY Mar. 2016

应力比对D36钢腐蚀疲劳裂纹扩展的影响

代娇荣 黄 一 吴智敏

大连理工大学建设工程学部 大连 116024

摘要: 采用三点弯曲实验研究应力比 R 对处于不同环境下的D36钢稳定裂纹扩展区疲劳裂纹扩展速率的影响。结果表明，空气中应力比对pairs区的疲劳裂纹扩展速率影响不大，然而海水环境中，在中等△K值范围内，应力比对裂纹扩展速率影响较空气中明显，且其裂纹扩展速率随着应力比的增加而增大。这种现象产生的原因是氢脆作用随着应力比的增大显著增强。通过三电极体系在 f=1 Hz，R=0.1条件下分别对试件施加-400，-600，-800，-1000和-1200 mV的电极电位。结果表明，强阴极极化 (-1200 mV) 和阳极极化 (-400 mV) 在一定△K范围内会加速裂纹扩展，综合得出该条件下腐蚀疲劳的阴极保护电位为-800 mV。而应力比为0.3和0.5时施加-800 mV的电极电位对材料的保护作用减弱。

关键词: 应力比 R D36钢 腐蚀疲劳 阴极保护电位 疲劳裂纹扩展速率

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6495(2016)02-0109-06

Effect of Stress Ratio on Corrosion Fatigue Crack Growth Rate of D36 Steel

DAI Jiaorong, HUANG Yi, WU Zhimin

Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: The effect of stress ratio R on the fatigue crack propagation rate (FCPR) of D36 steel was investigated in air and sea water with different applied potentials. The results reveal that by a given applied cyclic stress intensity △K in air, the da/dN-ΔK curve exhibits a slight change in fatigue crack propagation rate with the increase of stress ratio. However, by intermediate △K values, the increase of the fatigue crack propagation rate is obvious in sea water, which may be ascribed to the hydrogen embrittlement. With applied potentials with in a range from −400 to −1200 mV onto the test steels at f=1 Hz, R=0.1, it follows that with the potential corresponding toeither the over-cathodic protection (−1200 mV) or the anodic dissolution (−400 mV) conditions the corrosion fatigue crack propagation rate (CFCPR) will be accelerated within a certain △K range, and therewiththe optimal protection potential of −800 mV is identified. But the protection effect by the applied potential −800 mV was weakened with the increase of the stress ratio from 0.3 to 0.5.

Key words: stress ratio R, D36 steel, corrosion fatigue, cathodic protection potential, fatigue crack growth rate

1 前言

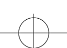
海洋平台作为开采石油的重要工具，所处的环境十分恶劣，除承受重力荷载外，还受到到波浪荷载、风荷载、冰荷载、地震荷载以及海水腐蚀等的影响[1]，这就决定了海洋平台用钢的特殊性。D36钢是为了满足海洋平台、船舶等在海洋环境下服役的钢结构专门研发的低合金高强钢，具有高韧性，高强度，耐腐蚀，抗疲劳以及抗层状撕裂性好等优点，是海洋平台和造船行业不可或缺的材料[2]。关于D36

定稿日期: 2015-04-22

作者简介: 代娇荣，女，1991年生，硕士

通讯作者: 吴智敏，E-mail: wuzhimin@dlut.edu.cn，研究方向为混凝土断裂力学及其工程应用、混凝土结构耐久性、混凝土结构加固理论及其应用

DOI: 10.11903/1002.6495.2015.095



钢，国内外研究主要集中在微观组织，焊接工艺及热处理工艺上[2,3]，针对其疲劳断裂性能的研究很少。而海水腐蚀环境中的疲劳裂纹扩展速率是海洋平台结构设计以及选材的重要参数。

金属的疲劳裂纹扩展受到环境因素作用，疲劳过程由疲劳裂纹的萌生，稳定扩展和失稳断裂阶段组成的，其扩展类型可简单归纳为3类[4]。其中，腐蚀疲劳裂纹扩展阶段约占总寿命的90%，直接决定了海洋钢平台的寿命[5]，因此，研究D36钢的裂纹扩展阶段的规律和特性很有必要。而应力比作为影响疲劳裂纹扩展的重要力学影响因素之一，国内外学者进行了大量实验和理论方面的研究。Dubey等[6]和Boyce等[7]通过紧凑拉伸实验得出不同应力比下的da/dN-△K曲线。结果表明，应力比越大，Ti-6Al-4V裂纹扩展门槛值越小，而在相同△K下裂纹扩展速率越大。Daniel等[8]通过分析不同铝合金的实验数据也得出了类似的结论，并且指出应力比主要对近门槛值区域和裂纹快速扩展速率影响较大，对Pairs区裂纹扩展速率影响较小。欧阳辉等[9]通过对比分析R对7种航天金属材料裂纹扩展速率影响的实验结果得出，应力比对塑性较差的材料影响较大。Elber等[10]最早认为应力比对金属材料疲劳裂纹扩展速率的影响主要是由于裂纹闭合效应，尤其是门槛值附近受其影响较大。众所周知，当裂纹尖端处于海洋腐蚀环境下，腐蚀疲劳裂纹扩展速率会增大。Kang等[11,12]通过三点弯曲实验，将相同的应力条件下海水和空气中钢结构疲劳进行对比，不仅验证了海水腐蚀环境会很大程度提高钢结构疲劳裂纹扩展速率，并且得出阳极溶解和氢致开裂机制是加速其疲劳裂纹扩展的两种主要机制。韩恩厚等[13]对低合金钢ZG20SIMn和SM50B-Zc实验结果进行分析，认为应力比的增大导致裂尖应变和应变速率的减小，从而使进入低合金钢中的氢和氢脆敏感性增大，所以氢致开裂是裂纹扩展加速的主导因素。赵维民等[14]通过模拟海洋环境中腐蚀疲劳裂纹尖端的应变，利用测得的电流密度理论计算由阳极溶解导致的裂纹扩展速率，得出阳极溶解不是导致X80钢腐蚀疲劳裂纹扩展的主要因素的结论。为了降低腐蚀环境对材料裂纹扩展速率的影响，阴极保护技术日益受到青睐。阴极保护是向被保护的金属通以一定直流电，使其成为阴极而得到保护的一种方法[15]。Kenan等[16]和王俭秋等[17]通过实验证实阳极极化和强阴极极化都会加速裂纹扩展，只有处于阴极保护电位下才能有效地减小裂纹扩展速率。Jones等[18]通过拉伸疲劳实验，在平均应力不变的情况下改变应力比，得到BS970∶976M33构件不同应力比下空气、海水和阴极保护情况的S-N曲线，结果均表明在短疲劳寿命区 (10^3~10^4 cyc)，增大应力比明显降低钢构件强度，且阴极保护下腐蚀疲劳强度在短循环次数区域并没有被提高，说明这个区域的疲劳寿命主要取决于塑性变形而不是环境因素。综上，腐蚀疲劳中应力比影响的研究较多，但关于在阴极保护条件下应力比对腐蚀疲劳影响却鲜有研究。

本文采用三点弯曲实验研究应力比对处于不同环境中D36钢疲劳裂纹扩展速率的影响，分析其变化规律及作用机制。另外，通过在相同应力比下施加不同电位确定应力比对阴极保护电位的影响，结合断口形貌分析实验现象和产生这些现象的原因。

2 实验方法

实验以D36钢为研究对象，其屈服强度、极限抗拉强度，弹性模量分别为436，524和2.1×10^5 N/mm^2。将钢件进行线切割，加工成尺寸为16 mm×32 mm×150 mm的标准三点弯曲试样，单边线切割缺口尺寸如图1。实验用海水采自大连黑石礁海域，海水成分 (mg/L) 为：Ca^{2+} 410，Mg^{2+} 1310，Na^+ 10900，K^+ 390，Ba^{2+} 0.05，Sr^{2+} 13，Fe^{2+}/Fe^{3+}＜0.02，Mn^{2+}＜0.01，Si 0.04~8，Cl^- 19700，SO_4^{2-} 2740，F^- 1.4，Br^- 65，NO_3^-＜0.7，HCO_3^- 152，B 4~5，TDS为35000，pH值为8.1。

实验在MTS 810电液伺服疲劳试验机上进行，将试样固定在自行设计的腐蚀疲劳三点弯曲试验装置上。实验前在常温空气环境下，采用频率为10 Hz，应力比为0.1的正弦波预制长度为2 mm疲劳裂纹。实验为荷载控制，以正弦波加载，在应力比为0.1，0.3，0.5的条件下进行实验，裂纹扩展长度以及裂纹扩展速率通过引伸计柔度法测量。疲劳环境分别为空气，海水和不同阴极电位。其中，电化学测量采用DJS-292型恒电位仪和以海水为电解液的三电极体系。三电极体系以试样为工作电极，铂丝为辅助电极，饱和甘汞电极为参比电极。

3 结果及分析

3.1 应力比对D36钢疲劳裂纹扩展的影响

图2为试件在空气中和海水中，应力比分别为0.1，

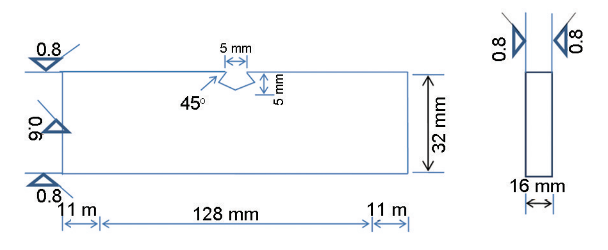
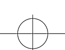


图1 实验试件形状和尺寸

Fig.1 Schematic diagram of the fatigue specimens



0.3，0.5条件下，中速裂纹扩展区 (10^{-3}~10^{-5} mm/cyc) 内的疲劳裂纹扩展速率 (da/dN) 对应力强度因子 (△K) 曲线图。从曲线图中可以看出，在相同△K下，空气中，应力比对pairs区的疲劳裂纹扩展速率影响不大，而在海水条件下，其疲劳裂纹扩展速率显著高于空气中，而且在中等△K值范围内，海水条件下应力比对裂纹扩展速率影响较空气中明显，且裂纹扩展速率随着应力比的增加而增大。Lal[19]的研究认为该阶段疲劳裂纹扩展由反向剪切机制控制，和裂纹闭合影响机制不同的是影响由反向剪切机制控制的裂纹扩展速率的主要参量是△K而不是K_{max}，故即使应力比不同，但只要△K相同，裂纹扩展速率数值也会非常接近。而在海水环境中的实验结果证实了腐蚀环境会显著加速金属材料疲劳裂纹的扩展。韩恩厚[13]等经过推导得出正弦波加载下裂尖局部总应变和总应变速率为：

$$\varepsilon_m + \varepsilon_d = \ln\left\{\frac{\mathrm{d}Y_i}{\mathrm{d}a}\frac{1}{2Y_0}\left[1+\frac{1-R}{1+R}\sin(2\pi ft)\right]^2\right\} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_m + \dot{\varepsilon}_d = \frac{2}{W}\frac{dY_i}{da}\frac{1}{Y_i}\frac{da}{dt} + \frac{4\pi f(1-R)\cos(2\pi ft)}{1+R+(1-R)\sin(2\pi ft)} \quad (2)$$

其中ε_m，ε_d分别为裂尖局部静态应变和动态应变；$\dot{\varepsilon}_m$，$\dot{\varepsilon}_d$分别为裂尖局部静态应变速率和动态应变速率；Y_i，Y_0分别为某一时刻和初始时刻试样的几何形状因子；α为裂纹长度；W为试样宽度；t为加载时间。

从该公式中可以看出，应力比增大会导致裂尖应变和应变速率的减小，从而使进入低合金钢中的氢和氢脆敏感性增大，所以在中等△K值范围内，腐蚀疲劳裂纹扩展速率会随着应力比的增加而增大。

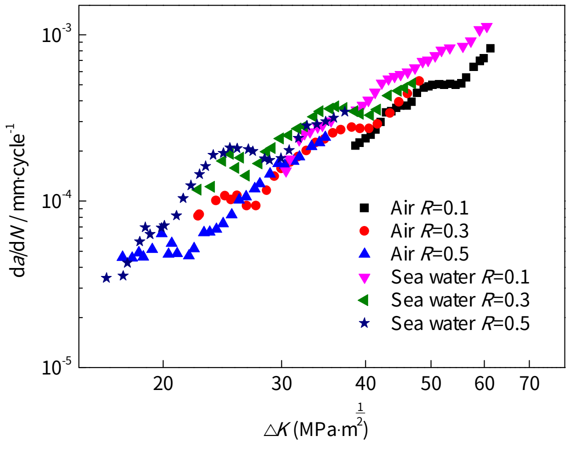


图2 空气和海水环境下D36钢在应力比R=0.1, 0.3, 0.5时的裂纹扩展速率

Fig.2 FCPR and CFCPR of D36 under several loading conditions R=0.1, 0.3, 0.5 in air and sea water environments

另外，在高速裂纹扩展区，海水和空气中的疲劳裂纹扩展速率逐渐接近，说明该区域疲劳裂纹扩展主要由力学因素控制，环境对其影响已经减弱。

3.2 极化电位对D36钢疲劳裂纹扩展速率的影响

Kenan等[16]在相同实验环境和加载条件下对AISI 4140施加不同电极电位，实验结果表明在阳极极化和强阴极极化情况下均会增大腐蚀疲劳裂纹扩展速率，并通过验证得出阳极溶解和氢致开裂分别是阳极极化和过阴极极化影响腐蚀疲劳裂纹扩展速率的主要因素，电位只有在两者之间的一定范围内才能起到阴极保护的效果。本文的实验结果如图3a~d所示，也表明在阳极极化电位-400 mV下，当35 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$＜△K＜60 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$时，疲劳裂纹扩展速率高于自由腐蚀状态下的裂纹扩展速率，最大为自由腐蚀裂纹扩展速率的1.17倍。同时，强阴极极化情况下 (-1200 mV)，当△K在27.5~37.5 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$范围内时，试样疲劳裂纹扩展速率高于自腐蚀状态，最大达到自腐蚀速率的1.24倍，而当△K＞40 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$后，其疲劳裂纹扩展速率逐渐靠近自腐蚀状态。而在-800 mV下，当40 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$＜△K＜55 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$时，其疲劳裂纹扩展速率较海水中的有一定程度的降低，最大降低12.2%，起到了一定的保护作用，而30 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$＜△K＜40 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$，保护效果不明显。所以将-800 mV作为该加载条件下的保护电位。

3.3 应力比对阴极保护电位的影响

如图4所示，通过对比应力比R=0.3下海水和-800mv的极化电位的腐蚀疲劳裂纹扩展速率，可以看出，仅当33 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$＜△K＜40MPa·m$^{\frac{1}{2}}$时，D36试样在-800 mV极化电位下的疲劳裂纹扩展速率低于自腐蚀状态，△K＞40 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$时，-800 mV下的疲劳裂纹扩展反而被加速。如图5所示，从相同应力比R=0.5下，海水和-800 mV极化电位下的腐蚀疲劳裂纹扩展速率的对比结果可以看出，当△K在18~20 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$和25~30 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$时，D36试样在-800 mV极化电位下疲劳裂纹扩展速率降低。在其他△K值下，极化电位 (-800 mV) 和自腐蚀状态的腐蚀疲劳裂纹扩展接近。由以上实验结果可以看出，R=0.1条件下确定的阴极保护最佳电位-800 mV对应力R=0.3和0.5的情况已不能起到良好保护效果。韩恩厚等[20]认为随着应力比的增大，裂尖氢含量和氢脆敏感性均会增加，原保护电位下阳极溶解与阴极的析氢反应平衡状态被打破，保护电位也会发生改

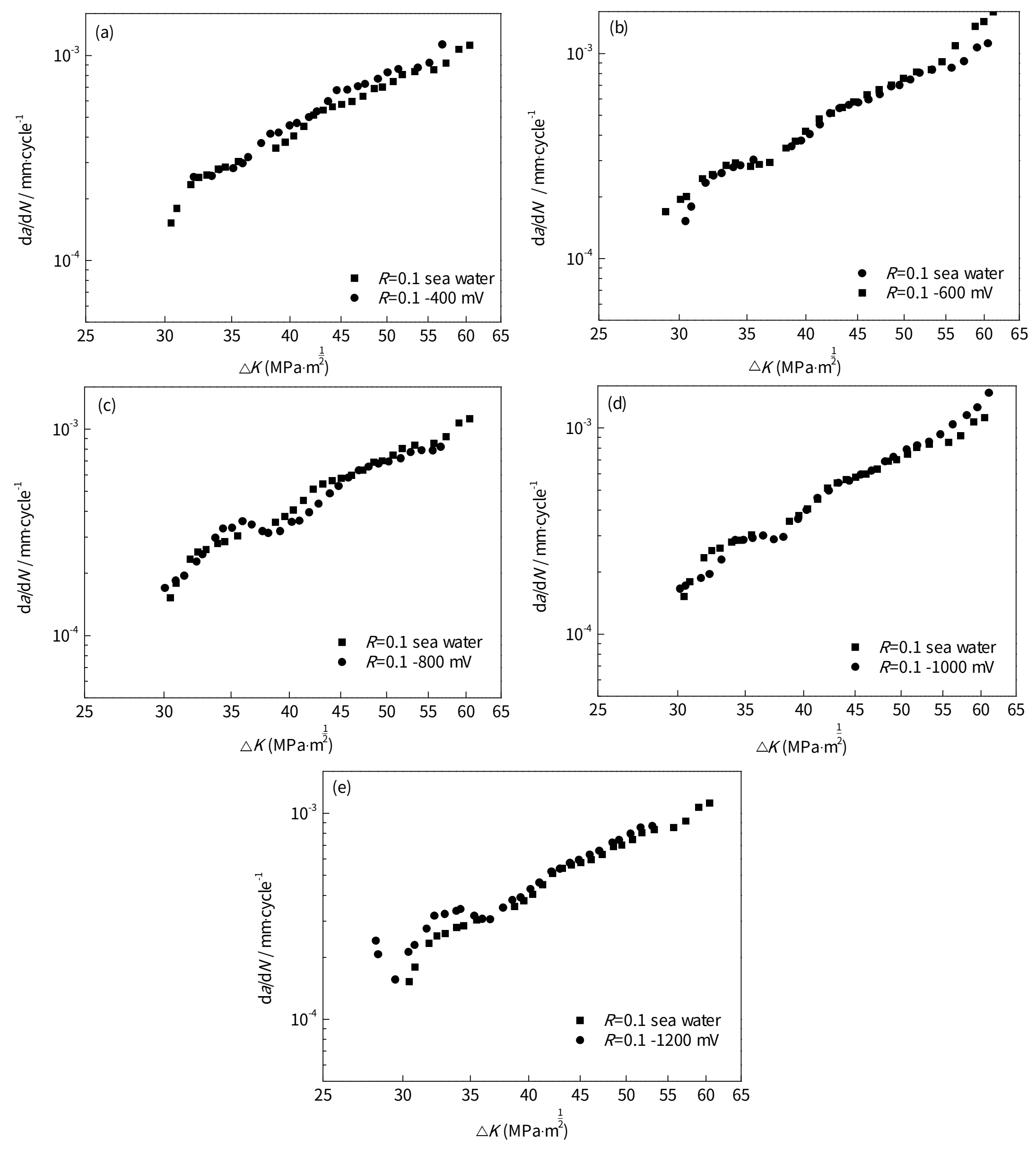


图3 *f*=1 Hz, *R*=0.1, D36钢在海水和各极化电位下的d*a*/d*N*-△*K*对比图

Fig.3 Comparision of FCPR at *f*=1 Hz, *R*=0.1 in sea water and a range of potentials: (a) −400 mV; (b)−600 mV; (c) −800 mV; (d)−1000 mV; (e) −1200 mV

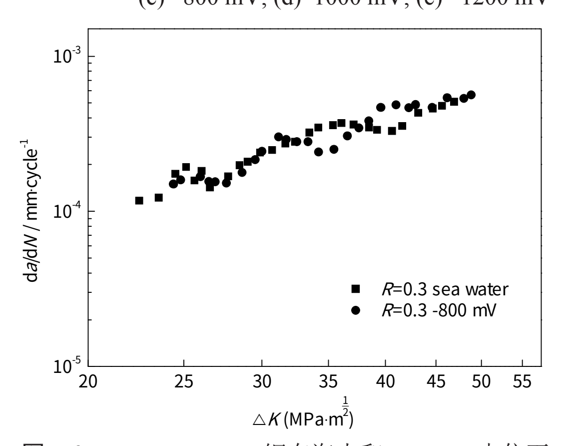


图4 *f*=1 Hz, *R*=0.3, D36钢在海水和−800 mV电位下的d*a*/d*N*-△*K*对比图

Fig.4 CFCPR of D36 at *f*=1 Hz, *R*=0.3 with various polarrization potentials

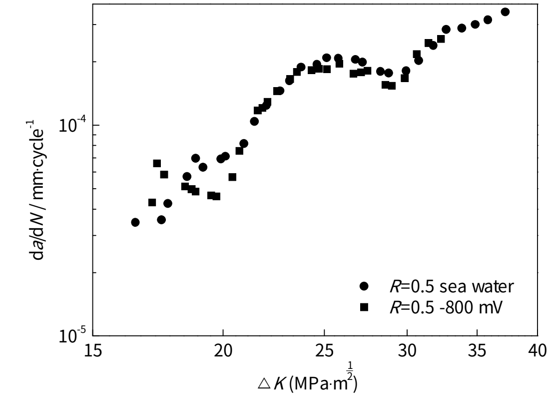
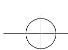


图5 *f*=1 Hz, *R*=0.5, D36钢在海水和−800 mV电位下的d*a*/d*N*-△*K*对比图

Fig.5 CFCPR of D36 at *f*=1 Hz, *R*=0.5 with various polarrization potentials



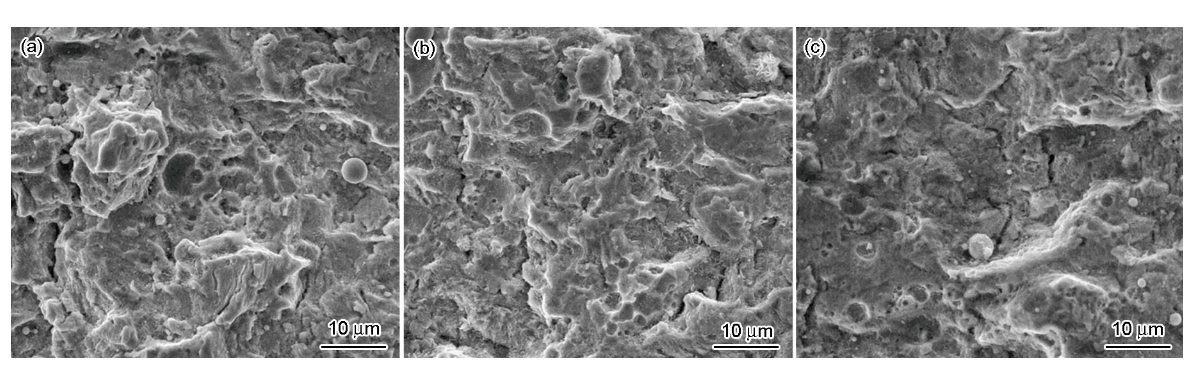


图6 海水浸泡循环加载表面裂纹的SEM像

Fig.6 SEM fractographs of the fracture surface of specimens which was cyclically loaded in seawater: (a) R=0.1, f=1 Hz; (b) R=0.3, f=1 Hz; (c) R=0.5, f=1 Hz

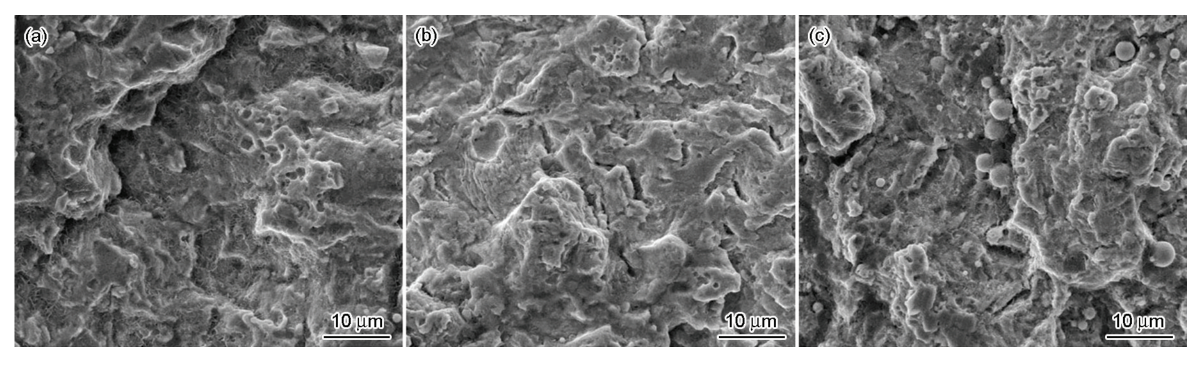


图7 −800 mV阴极保护条件下海水浸泡循环加载表面裂纹的SEM像

Fig.7 SEM fractographs of the fracture surface of specimens which was cyclically loaded in seawater under −800 mV: (a) R=0.1, f=1 Hz; (b) R=0.3, f=1 Hz; (c) R=0.5, f=1 Hz

变。对实际工程结构施加阴极保护时，应视具体情况而定，否则将会弄巧成拙，造成更大的损失。

将D36钢腐蚀疲劳试样压断后，观察其疲劳断口形貌。图6和7分别为试样在海水和-800 mV电极电位下处于不同应力比下的断口扫描电镜像。图中腐蚀坑和晶间裂纹同时存在，表明腐蚀疲劳裂纹由阳极溶解和氢致开裂共同促进。

4 结论

(1) 应力比对空气中D36钢疲劳裂纹扩展速率影响很小，但对海水环境中试件影响较大且腐蚀疲劳裂纹扩展速率随着应力比的增加而增大。

(2) 不同应力比条件下D36钢的阴极保护电位不同，应根据实际情况采用不同的保护电位。

(3) 氢脆机制是控制应力比对腐蚀环境中D36钢疲劳裂纹扩展速率影响的主要机制。

参考文献

[1] 石春华. 海洋钢平台调研 [J]. 重钢技术, 2010, 53(3): 21

[2] 许可望, 杨涛, 李维锋等. D36海洋平台用钢Plasma-MIG复合电弧焊接工艺研究 [J]. 电焊机, 2014, 44(3): 83

[3] 王志坚, 蒋军等. 海洋平台用钢D36超大厚度焊接接头CTOD试验 [J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 103

[4] 业成等. oCr18Ni9奥氏体不锈钢在低浓度NaCl溶液中的腐蚀疲劳裂纹扩展规律及机理研究 [J]. 材料工程, 2000, 17(2): 27

[5] Suresh S. Fatigue of Materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998

[6] Dubey S, Soboyejo A B O, Soboyejo W O. An investigation of the effects of stress ratio and crack closure on the micromechanisms of fatigue crack growth in Ti-6Al-4V [J]. Acta Mater., 1997, 45(7): 2777

[7] Boyce R. Effect of load ratio and maximum stress intensity on the fatigue threshold in Ti-6Al-4V [J]. Eng. Fracture Mech., 2001, 68(2): 129

[8] Kujawski D. Enhanced model of partial crack closure for correlation of R-ratio effects in aluminum alloys [J]. Int. J. Fatigue, 2001, 23(2): 95

[9] 欧阳辉, 刘俊洲, 苏小燕等. 应力比R对疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. 固体力学学报, 1984, 4: 8

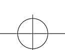
[10] Elber W, Elber W. The significance of fatigue crack closure [A]. In Damage Tolerance in Aircraft Structures [C]. ASTM STP, 1971: 486

[11] Kang D H, Lee J K, Kim T W. Corrosion fatigue crack propagation in a heat affected zone of high-performance steel in an underwater sea environment [J]. Eng. Fail. Anal., 2011, 18(2): 557

[12] Kang D H, Lee J K, Kim T W. Corrosion fatigue crack propagation of high-strength steel HSB800 in a seawater environment [J]. Proc. Eng., 2011, 10: 1170

[13]韩恩厚, 韩玉梅, 郑宇礼等. 应力比和频率对低合金钢腐蚀疲劳裂纹扩展机理的影响 [J]. 金属学报, 1993, 29(5): 31

[14] Zhao W, Xin R, He Z, et al. Contribution of anodic dissolution to



the corrosion fatigue crack propagation of X80 steel in 3.5wt.% NaCl solution [J]. Corros. Sci., 2012, 63: 387

[15] 张脉松, 尹鹏飞, 马长江. 海洋平台外加电流阴极保护技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2013, (3): 20

[16] Kenan G, Mehmet D. Effect of cathodic polarization on corrosion fatigue behaviour of ion nitride AISI 4140 steel [J]. Int. J. Fatigue, 2002, 24(5): 537

[17] 王俭秋, 李劲, 柯伟. 极化和频率对A537 钢在3.5%NaCl溶液中的腐蚀疲劳裂纹扩展行为的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1997, 9(4): 286

[18] Jones W J D, Blackie A P. Effect of stress ratio on the cyclic tension corrosion fatigue life of notched steel BS970: 976M33 in sea water with cathodicprotection [J]. Int. J. Fatigue, 1989, 11(6): 417

[19] Lal D N. A detailed physical analysis of the R-effect on lefm fatigue crack growth-II. On the combined roles of growth mechanisms and stress ratio [J]. Eng. Fracture Mech., 1996, 55(2): 289

[20] 韩恩厚. 腐蚀疲劳裂纹扩展规律与机理 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1991, 3: 15

